

Beyond Moore's technologies: Operation principles of a superconductor alternative

Soloviev I., Klenov N., Bakurskiy S., Kupriyanov M., Gudkov A., Sidorenko A.
Kazan Federal University, 420008, Kremlevskaya 18, Kazan, Russia

Abstract

© 2017 Soloviev et al. The predictions of Moore's law are considered by experts to be valid until 2020 giving rise to "post-Moore's" technologies afterwards. Energy efficiency is one of the major challenges in high-performance computing that should be answered. Superconductor digital technology is a promising post-Moore's alternative for the development of supercomputers. In this paper, we consider operation principles of an energy-efficient superconductor logic and memory circuits with a short retrospective review of their evolution. We analyze their shortcomings in respect to computer circuits design. Possible ways of further research are outlined.

<http://dx.doi.org/10.3762/bjnano.8.269>

Keywords

Energy-efficient computing, Josephson memory, Superconducting computer, Superconductor digital electronics, Superconductor logics

References

- [1] Simonite, T. Intel Puts the Brakes on Moore's Law, MIT Tech. Review, 23 March 2016. <https://www.technologyreview.com/s/601102/intel-puts-the-brakes-onmoores-law/> (accessed June 2, 2017).
- [2] Simonite, T. Moore's Law Is Dead. Now What?, MIT Tech. Review, 13 May 2016. <https://www.technologyreview.com/s/601441/moores-law-is-dead-now-what/> (accessed June 2, 2017).
- [3] Colwell, R. The Chip Design Game at the End of Moore's Law, Hot Chips, August 2013. http://www.hotchips.org/wp-content/uploads/hc_archives/hc25/HC25.15-keynote1-Chipdesign-epub/HC25.26.190-Keynote1-ChipDesignGame-Colwell-DARPA.pdf (accessed June 2, 2017).
- [4] Ball, P. Nature 2012, 492, 174-176. doi:10.1038/492174a
- [5] Service, R. F. Science 2012, 335, 394-396. doi:10.1126/science.335.6067.394
- [6] Markov, I. L. Nature 2014, 512, 147-154. doi:10.1038/nature13570
- [7] Sunway TaihuLight. <http://www.top500.org/system/178764> (accessed June 2, 2017).
- [8] Brock, D. C. IEEE Spectrum 2016, 53, 54-60. doi:10.1109/MSPEC.2016.7420401
- [9] Paving the Roadmap to Exascale. (accessed Nov 15, 2017). <https://web.archive.org/web/20160709143338/http://www.scidacreview.org:80/1001/html/hardware.html>
- [10] Debenedictis, E.; Cook, J.; Metodi, T. S.; Hoemmen, M. F.; Marinella, M.; Schiek, R.; Zima, H. Beyond Moore's Law and Implications for Computing in Space by Air Force Research Laboratory presentation. 2015; <https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1260528> (accessed June 2, 2017).
- [11] Mukhanov, O. A. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011, 21, 760-769. doi:10.1109/TASC.2010.2096792
- [12] Zhirnov, V. V.; Cavin, R. K.; Hutchby, J. A.; Bourianoff, G. I. Proc. IEEE 2003, 91, 1934-1939. doi:10.1109/JPROC.2003.818324

- [13] Xu, Q.; Yamanashi, Y.; Ayala, C. L.; Takeuchi, N.; Orllepp, T.; Yoshikawa, N. Design of an Extremely Energy-Efficient Hardware Algorithm Using Adiabatic Superconductor Logic. In Proceedings of 15th International Superconductive Electronics Conference, ISEC'2015, Nagoya, Japan, July 6-9, 2015; DS-P21. doi:10.1109/ISEC.2015.7383446
- [14] Cryogenic Computing Complexity (C3). <https://www.iarpa.gov/index.php/research-programs/c3> (accessed June 2, 2017).
- [15] Holmes, D. S.; Kadin, A. M.; Johnson, M. W. Computer 2015, 48, 34-42. doi:10.1109/MC.2015.375
- [16] Likharev, K. K.; Semenov, V. K. IEEE Trans. Appl. Supercond. 1991, 1, 3-28. doi:10.1109/77.80745
- [17] Ginzburg, V. L.; Landau, L. D. J. Exp. Theor. Phys. 1950, 20, 1064-1081.
- [18] Stewart, W. C. Appl. Phys. Lett. 1968, 12, 277. doi:10.1063/1.1651991
- [19] Tolpygo, S. K. Low Temp. Phys. 2016, 42, 463-485. doi:10.1063/1.4948618
- [20] Niobium Process. <http://www.hypres.com/foundry/niobium-process/> (accessed June 2, 2017).
- [21] Gupta, D.; Li, W.; Kaplan, S. B.; Vernik, I. V. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2001, 11, 731-734. doi:10.1109/77.919449
- [22] Filippov, T. V.; Amparo, D.; Kamkar, M. Y.; Walter, J.; Kirichenko, A. F.; Mukhanov, O. A.; Vernik, I. V. Experimental Investigation of ERSFQ Circuit for Parallel Multibit Data Transmission. In Proceedings of 16th International Superconductive Electronics Conference, ISEC'2017, Sorrento, Italy, June 12-16, 2017; TU-C-D-G-01.
- [23] Likharev, K. K.; Mukhanov, O. A.; Semenov, V. K. In SQUID '85 [Eighty-Five]: Superconducting Quantum Interference Devices and Their Applications, Proceedings of the International Conference on Superconducting Quantum Devices, v. Hahlbohm, H.-D.; Läbbig, H., Eds.; De Gruyter: Berlin, Germany, 1985; pp 1103-1108.
- [24] Likharev, K. K. Phys. C (Amsterdam, Neth.) 2012, 482, 6-18. doi:10.1016/j.physc.2012.05.016
- [25] Mukhanov, O. A. History of Superconductor Analog-to-Digital Converters. In 100 Years of Superconductivity; Rogalla, H.; Kes, P., Eds.; Taylor & Francis: London, United Kingdom, 2011; pp 440-458.
- [26] Mukhanov, O. A.; Gupta, D.; Kadin, A. M.; Semenov, V. K. Proc. IEEE 2004, 92, 1564-1584. doi:10.1109/JPROC.2004.833660
- [27] Mukhanov, O. A. Digital Processing, Superconductor Digital Electronics. In Applied Superconductivity: Handbook on Devices and Applications; Seidel, P., Ed.; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, Germany, 2015; pp 1-28.
- [28] Chen, W.; Rylyakov, A. V.; Patel, V.; Lukens, J. E.; Likharev, K. K. Appl. Phys. Lett. 1998, 73, 2817-2819. doi:10.1063/1.122600
- [29] Hamilton, C. A.; Lloyd, F. L. IEEE Electron. Dev. Lett. 1982, 3, 335-338. doi:10.1109/EDL.1982.25592
- [30] Mukhanov, O. A.; Semenov, V. K.; Likharev, K. K. IEEE Trans. Magn. 1987, 23, 759-762. doi:10.1109/TMAG.1987.1064951
- [31] Rylyakov, A. V. IEEE Trans. Appl. Supercond. 1997, 7, 2709-2712. doi:10.1109/77.621797
- [32] Yoshikawa, N.; Kato, Y. Supercond. Sci. Technol. 1999, 12, 918-920. doi:10.1088/0953-2048/12/11/367
- [33] Yamanashi, Y.; Nishigai, T.; Yoshikawa, N. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2007, 17, 150-153. doi:10.1109/TASC.2007.898608
- [34] Tanaka, M.; Kitayama, A.; Kouketsu, T.; Ito, M.; Fujimaki, A. Jpn. J. Appl. Phys. 2012, 51, 053102. doi:10.7567/JJAP.51.053102
- [35] Tanaka, M.; Kitayama, A.; Kouketsu, T.; Ito, M.; Fujimaki, A. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2013, 23, 1701104. doi:10.1109/TASC.2013.2240555
- [36] Rylyakov, A. V.; Likharev, K. K. IEEE Trans. Appl. Supercond. 1999, 9, 3539-3544. doi:10.1109/77.783794
- [37] Kirichenko, D. E.; Sarwana, S.; Kirichenko, A. F. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011, 21, 776-779. doi:10.1109/TASC.2010.2098432
- [38] Volkmann, M. H.; Sahu, A.; Fourie, C. J.; Mukhanov, O. A. Supercond. Sci. Technol. 2013, 26, 015002. doi:10.1088/0953-2048/26/1/015002
- [39] Volkmann, M. H.; Vernik, I. V.; Mukhanov, O. A. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015, 25, 1301005. doi:10.1109/TASC.2014.2379191
- [40] Vernik, I. V.; Kaplan, S. B.; Volkmann, M. H.; Dotsenko, A. V.; Fourie, C. J.; Mukhanov, O. A. Supercond. Sci. Technol. 2014, 27, 044030. doi:10.1088/0953-2048/27/4/044030
- [41] Mukhanov, O. A. IEEE Trans. Appl. Supercond. 1993, 3, 3102-3113. doi:10.1109/77.251810
- [42] Averin, D. V.; Rabenstein, K.; Semenov, V. K. Phys. Rev. B 2006, 73, 094504. doi:10.1103/PhysRevB.73.094504
- [43] Soloviev, I. I.; Klenov, N. V.; Pankratov, A. L.; Il'ichev, E.; Kuzmin, L. S. Phys. Rev. E 2013, 87, 060901. doi:10.1103/PhysRevE.87.060901

- [44] Filippov, T. V.; Sahu, A.; Sarwana, S.; Gupta, D.; Semenov, V. K. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2009, 19, 580-584. doi:10.1109/TASC.2009.2018426
- [45] Peng, X.; Xu, Q.; Kato, T.; Yamanashi, Y.; Yoshikawa, N.; Fujimaki, A.; Takagi, N.; Takagi, K.; Hidaka, M. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2015, 25, 1301106. doi:10.1109/TASC.2014.2382973
- [46] Herr, Q. P.; Herr, A. Y.; Oberg, O. T.; Ioannidis, A. G. *J. Appl. Phys.* 2011, 109, 103903. doi:10.1063/1.3585849
- [47] Oberg, O. T. *Superconducting Logic Circuits Operating With Reciprocal Magnetic Flux Quanta*. Ph.D. Thesis, University of Maryland, Maryland, MD, U.S.A., 2011.
- [48] Herr, A. Y.; Herr, Q. P.; Oberg, O. T.; Naaman, O.; Przybysz, J. X.; Borodulin, P.; Shauck, S. B. *J. Appl. Phys.* 2013, 113, 033911. doi:10.1063/1.4776713
- [49] Landauer, R. *IBM J. Res. Dev.* 1961, 5, 183-191. doi:10.1147/rd.53.0183
- [50] Takeuchi, N.; Yamanashi, Y.; Yoshikawa, N. *Sci. Rep.* 2014, 4, 6354. doi:10.1038/srep06354
- [51] Likharev, K. K. *IEEE Trans. Magn.* 1977, 13, 242-244. doi:10.1109/TMAG.1977.1059351
- [52] Goto, E. *Proc. IRE* 1959, 47, 1304-1316.
- [53] Likharev, K. K.; Korotkov, A. N. *Science* 1996, 273, 763-765. doi:10.1126/science.273.5276.763
- [54] Lent, C. S.; Tougaw, P. D. *Proc. IEEE* 1997, 85, 541-557. doi:10.1109/5.573740
- [55] Likharev, K. K. *Int. J. Theor. Phys.* 1982, 21, 311-326. doi:10.1007/BF01857733
- [56] Likharev, K. K.; Rylov, S. V.; Semenov, V. K. *IEEE Trans. Magn.* 1985, 21, 947-950. doi:10.1109/TMAG.1985.1063673
- [57] Hosoya, M.; Hioe, W.; Casas, J.; Kamukawai, R.; Harada, Y.; Wada, Y.; Nakane, H.; Suda, R.; Goto, E. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1991, 1, 77-89. doi:10.1109/77.84613
- [58] Bennett, C. H. *IBM J. Res. Dev.* 1973, 17, 525-532. doi:10.1147/rd.176.0525
- [59] Hosoya, M.; Hioe, W.; Takagi, K.; Goto, E. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1995, 5, 2831-2834. doi:10.1109/77.403181
- [60] Johnson, M. W.; Bunyk, P.; Maibaum, F.; Tolkacheva, E.; Berkley, A. J.; Chapple, E. M.; Harris, R.; Johansson, J.; Lanting, T.; Perminov, I.; Ladizinsky, E.; Oh, T.; Ros, G. *Supercond. Sci. Technol.* 2010, 23, 065004. doi:10.1088/0953-2048/23/6/065004
- [61] Berkley, A. J.; Johnson, M. W.; Bunyk, P.; Harris, R.; Johansson, J.; Lanting, T.; Ladizinsky, E.; Tolkacheva, E.; Amin, M. H. S.; Rose, G. *Supercond. Sci. Technol.* 2010, 23, 105014. doi:10.1088/0953-2048/23/10/105014
- [62] Fujimaki Laboratory 2014-2015. <http://www.super.nuqe.nagoya-u.ac.jp/alca/> (accessed June 2, 2017).
- [63] Takeuchi, N.; Ozawa, D.; Yamanashi, Y.; Yoshikawa, N. *Supercond. Sci. Technol.* 2013, 26, 035010. doi:10.1088/0953-2048/26/3/035010
- [64] Takeuchi, N.; Yamanashi, Y.; Yoshikawa, N. *Appl. Phys. Lett.* 2013, 102, 052602. doi:10.1063/1.4790276
- [65] Takeuchi, N.; Yamanashi, Y.; Yoshikawa, N. *Appl. Phys. Lett.* 2013, 103, 062602. doi:10.1063/1.4817974
- [66] Takeuchi, N.; Ortlepp, T.; Yamanashi, Y.; Yoshikawa, N. *J. Appl. Phys.* 2014, 115, 103910. doi:10.1063/1.4868336
- [67] Takeuchi, N.; Yamanashi, Y.; Yoshikawa, N. *J. Appl. Phys.* 2015, 117, 173912. doi:10.1063/1.4919838
- [68] Takeuchi, N.; Yamanashi, Y.; Yoshikawa, N. *Supercond. Sci. Technol.* 2015, 28, 015003. doi:10.1088/0953-2048/28/1/015003
- [69] Nagasawa, S.; Hinode, K.; Satoh, T.; Akaike, H.; Kitagawa, Y.; Hidaka, M. *Phys. C (Amsterdam, Neth.)* 2004, 412-414, 1429-1436. doi:10.1016/j.physc.2003.12.097
- [70] Narama, T.; Yamanashi, Y.; Takeuchi, N.; Ortlepp, T.; Yoshikawa, N. *Demonstration of 10k Gate-Scale Adiabatic-Quantum-Flux-Parametron Circuits*. In *Proceedings of 15th International Superconductive Electronics Conference, ISEC'2015, Nagoya, Japan, July 6-9, 2015*; DS-P04-INV.
- [71] Fang, K.; Takeuchi, N.; Ando, T.; Yamanashi, Y.; Yoshikawa, N. *J. Appl. Phys.* 2017, 121, 143901. doi:10.1063/1.4979856
- [72] Semenov, V. K.; Danilov, G. V.; Averin, D. V. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2003, 13, 938. doi:10.1109/TASC.2003.814155
- [73] Semenov, V. K.; Danilov, G. V.; Averin, D. V. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2007, 17, 455. doi:10.1109/TASC.2007.898260
- [74] Ren, J.; Semenov, V. K.; Polyakov, Y. A.; Averin, D. V.; Tsai, J.-S. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2009, 19, 961-967. doi:10.1109/TASC.2009.2018250
- [75] Ren, J.; Semenov, V. K. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2011, 21, 780-786. doi:10.1109/TASC.2011.2104352
- [76] Deng, Q.; Averin, D. V. *J. Exp. Theor. Phys.* 2014, 119, 1152-1162. doi:10.1134/S1063776114120012
- [77] Semenov, V. K.; Polyakov, Y. A.; Tolpygo, S. K. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2015, 25, 1301507. doi:10.1109/TASC.2014.2382665

- [78] Semenov, V. K.; Polyakov, Y. A.; Tolpygo, S. K. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2017, 27, 1301409. doi:10.1109/TASC.2017.2669585
- [79] Mukaiyama, T.; Takeuchi, N.; Yamanashi, Y.; Yoshikawa, N. Supercond. Sci. Technol. 2013, 26, 035018. doi:10.1088/0953-2048/26/3/035018
- [80] Nagasawa, S.; Hinode, K.; Stoh, T.; Kitagawa, Y.; Hidaka, M. Supercond. Sci. Technol. 2006, 19, S325. doi:10.1088/0953-2048/19/5/S34
- [81] Kirichenko, A. F.; Vernik, I. V.; Mukhanov, O. A.; Ohki, T. A. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015, 25, 1301304. doi:10.1109/TASC.2014.2385479
- [82] Sato, K.; Yamanashi, Y.; Yoshikawa, N. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015, 25, 1301605. doi:10.1109/TASC.2015.2398675
- [83] Nevirkovets, I. P.; Chernyashevskyy, O.; Prokopenko, G. V.; Mukhanov, O. A.; Ketterson, J. B. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2014, 24, 1800506. doi:10.1109/TASC.2014.2318317
- [84] McCaughan, A. N.; Berggren, K. K. Nano Lett. 2014, 14, 5748-5753. doi:10.1021/nl502629x
- [85] Nevirkovets, I. P.; Chernyashevskyy, O.; Prokopenko, G. V.; Mukhanov, O. A.; Ketterson, J. B. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015, 25, 1800705. doi:10.1109/TASC.2015.2390143
- [86] Kerman, A. J.; Yang, J. K. W.; Molnar, R. J.; Dauler, E. A.; Berggren, K. K. Phys. Rev. B 2009, 79, 100509. doi:10.1103/PhysRevB.79.100509
- [87] Semenov, A. D.; Gol'tsman, G. N.; Sobolewski, R. Supercond. Sci. Technol. 2002, 15, R1-16. doi:10.1088/0953-2048/15/4/201
- [88] Zhao, Q.-Y.; McCaughan, A. N.; Dane, A. E.; Berggren, K. K.; Orltapp, T. Supercond. Sci. Technol. 2017, 30, 044002. doi:10.1088/1361-6668/aa5f33
- [89] Tanaka, M.; Suzuki, M.; Konno, G.; Ito, Y.; Fujimaki, A.; Yoshikawa, N. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2017, 27, 1800904. doi:10.1109/TASC.2016.2646929
- [90] Semenov, V. K. Erasing Logic-Memory Boundaries in Superconductor Electronics. In IEEE International Conference on Rebooting Computing (ICRC), 2016 IEEE ICRC, San Diego, CA, U.S.A., Oct 17-19, 2016; pp 16463827 ff. doi:10.1109/ICRC.2016.7738711
- [91] Di Ventra, M.; Pershin, Y. V. Nat. Phys. 2013, 9, 200-202. doi:10.1038/nphys2566
- [92] Yang, J. J.; Strukhov, D. B.; Stewart, D. R. Nat. Nanotechnol. 2012, 8, 13. doi:10.1038/nnano.2012.240
- [93] Semenov, V. K. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2013, 23, 1700908. doi:10.1109/TASC.2012.2237214
- [94] Olson Reichhardt, C. J.; Reichhardt, C.; Hastings, M. B.; Jankò, B. Phys. C (Amsterdam, Neth.) 2004, 404, 266-272. doi:10.1016/j.physc.2003.11.040
- [95] Milosevic, M. V.; Berdiyorov, G. R.; Peeters, F. M. Appl. Phys. Lett. 2007, 91, 212501. doi:10.1063/1.2813047
- [96] Crotty, P.; Schult, D.; Segall, K. Phys. Rev. E 2010, 82, 011914. doi:10.1103/PhysRevE.82.011914
- [97] Chiarello, F.; Carelli, P.; Castellano, M. G.; Torrioli, G. Supercond. Sci. Technol. 2013, 26, 125009. doi:10.1088/0953-2048/26/12/125009
- [98] Schegolev, A. E.; Klenov, N. V.; Soloviev, I. I.; Tereshonok, M. V. Beilstein J. Nanotechnol. 2016, 7, 1397-1403. doi:10.3762/bjnano.7.130
- [99] Steffen, M.; DiVincenzo, D. P.; Chow, J. M.; Theis, T. N.; Ketchen, M. B. IBM J. Res. Dev. 2011, 55, 13. doi:10.1147/JRD.2011.2165678
- [100] Devoret, M. H.; Schoelkopf, R. J. Science 2013, 339, 1169-1174. doi:10.1126/science.1231930
- [101] McDermott, R.; Vavilov, M. G. Phys. Rev. Appl. 2014, 2, 014007. doi:10.1103/PhysRevApplied.2.014007
- [102] Soloviev, I. I.; Klenov, N. V.; Bakurskiy, S. V.; Pankratov, A. L.; Kuzmin, L. S. Appl. Phys. Lett. 2014, 105, 202602. doi:10.1063/1.4902327
- [103] Soloviev, I. I.; Klenov, N. V.; Pankratov, A. L.; Revin, L. S.; Il'ichev, E.; Kuzmin, L. S. Phys. Rev. B 2015, 92, 014516. doi:10.1103/PhysRevB.92.014516
- [104] Tolpygo, S. K.; Bolkhovsky, V.; Rastogi, R.; Zarr, S.; Day, A. L.; Weir, T. J.; Wynn, A.; Johnson, L. M. arXiv 2017, No. 1704.07683v1. doi:10.1134/S1063776112030144
- [105] Gudkov, A. L.; Kupriyanov, M. Yu.; Samus', A. N. J. Exp. Theor. Phys. 2012, 114, 818-829. doi:10.1134/S1063776112030144
- [106] Olaya, D.; Dresselhaus, P. D.; Hopkins, P. F.; Benz, S. P. Fabrication of High-Speed and High-Density Single-Flux-Quantum Circuits at NIST. In Proceedings of 16th International Superconductive Electronics Conference, ISEC'2017, Sorrento, Italy, June 12-16, 2017; TU-MAF-08.
- [107] Orltapp, T.; Ariando; Mielke, O.; Verwijs, C. J. M.; Foo, K. F. K.; Rogalla, H.; Uhlmann, F. H.; Hilgenkamp, H. Science 2006, 312, 1495-1497. doi:10.1126/science.1126041
- [108] Feofanov, A. K.; Oboznov, V. A.; Bol'ginov, V. V.; Lisenfeld, J.; Poletto, S.; Ryazanov, V. V.; Rossolenko, A. N.; Khabipov, M.; Balashov, D.; Zorin, A. B.; Dmitriev, P. N.; Koshelets, V. P.; Ustinov, A. V. Nat. Phys. 2010, 6, 593-597. doi:10.1038/nphys1700

- [109] Gingrich, E. C.; Niedzielski, B. M.; Glick, J. A.; Wang, Y.; Miller, D. L.; Loloee, R.; Pratt, W. P., Jr.; Birge, N. O. *Nat. Phys.* 2016, 12, 564-567. doi:10.1038/nphys3681
- [110] Herr, A. Y.; Herr, Q. P.; Naaman, O. Phase hysteretic magnetic Josephson junction memory cell. U.S. Patent US 9208861 B2, Dec 8, 2015.
- [111] Bunyk, P.; Likharev, K.; Zinoviev, D. *Int. J. High Speed Electron. Syst.* 2001, 11, 257-305. doi:10.1142/S012915640100085X
- [112] Kurosawa, I.; Nakagawa, H.; Kosaka, S.; Aoyagi, M.; Takada, S. *IEEE J. Solid-State Circuits* 1989, 24, 1034-1040. doi:10.1109/4.34089
- [113] Suzuki, H.; Fujimaki, N.; Tamura, H.; Imamura, T.; Hasuo, S. *IEEE Trans. Magn.* 1989, 25, 783-788. doi:10.1109/20.92404
- [114] Polonsky, S. V.; Kirichenko, A. F.; Semenov, V. K.; Likharev, K. K. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1995, 5, 3000-3005. doi:10.1109/77.403223
- [115] Tahara, S.; Ishida, I.; Nagasawa, S.; Hidaka, M.; Tsuge, H.; Wada, Y. *IEEE Trans. Magn.* 1991, 27, 2626-2632. doi:10.1109/20.133751
- [116] Nagasawa, S.; Hashimoto, Y.; Numata, H.; Tahara, S. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1995, 5, 2447-2452. doi:10.1109/77.403086
- [117] Nagasawa, S.; Numata, H.; Hashimoto, Y.; Tahara, S. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1999, 9, 3708-3713. doi:10.1109/77.783834
- [118] Nagasawa, S.; Hinode, K.; Satoh, T.; Kitagawa, Y.; Hidaka, M. *Supercond. Sci. Technol.* 2006, 19, S325-S330. doi:10.1088/0953-2048/19/5/S34
- [119] Liu, Q.; Van Duzer, T.; Meng, X.; Whiteley, S. R.; Fujiwara, K.; Tomida, T.; Tokuda, K.; Yoshikawa, N. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2005, 15, 415-418. doi:10.1109/TASC.2005.849863
- [120] Yoshikawa, N.; Tomida, T.; Tokuda, K.; Liu, Q.; Meng, X.; Whiteley, S. R.; Van Duzer, T. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2005, 15, 267-271. doi:10.1109/TASC.2005.849786
- [121] Fujiwara, K.; Liu, Q.; Van Duzer, T.; Meng, X.; Yoshikawa, N. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2010, 20, 14-19. doi:10.1109/TASC.2009.2034471
- [122] Ortlepp, T.; Zheng, L.; Whiteley, S. R.; Van Duzer, T. *Supercond. Sci. Technol.* 2013, 26, 035007. doi:10.1088/0953-2048/26/3/035007
- [123] Van Duzer, T.; Zheng, L.; Whiteley, S. R.; Kim, H.; Kim, J.; Meng, X.; Ortlepp, T. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2013, 23, 1700504. doi:10.1109/TASC.2012.2230294
- [124] Suzuki, H.; Inoue, A.; Imamura, T.; Hasuo, S. *Tech. Dig.-Int. Electron Devices Meet.* 1988, 290-293.
- [125] Kong, L.; Lu, Y.; Alon, E. A multi-GHz area-efficient comparator with dynamic offset cancellation. In *Custom Integrated Circuits Conference 2011, CICC 2011, San Jose, CA, U.S.A., Sept 19-21, 2011*; pp 1-4. doi:10.1109/CICC.2011.6055311
- [126] Mukhanov, O. A. Recent Progress in Digital Superconducting Electronics. In *Proceedings of 15th International Superconductive Electronics Conference, ISEC'2015, Nagoya, Japan, July 6-9, 2015*; CRP54.
- [127] Golubov, A. A.; Kupriyanov, M. Yu.; Il'ichev, E. *Rev. Mod. Phys.* 2004, 76, 411. doi:10.1103/RevModPhys.76.411
- [128] Bergeret, F. S.; Volkov, A. F.; Efetov, K. B. *Rev. Mod. Phys.* 2005, 77, 1321. doi:10.1103/RevModPhys.77.1321
- [129] Blamire, M. G.; Robinson, J. W. A. *J. Phys.: Condens. Matter* 2014, 26, 453201. doi:10.1088/0953-8984/26/45/453201
- [130] Eschrig, M. *Rep. Prog. Phys.* 2015, 78, 104501. doi:10.1088/0034-4885/78/10/104501
- [131] Linder, J.; Robinson, J. W. A. *Nat. Phys.* 2015, 11, 307-315. doi:10.1038/NPHYS3242
- [132] Lu, J. W.; Chen, E.; Kabir, M.; Stan, M. R.; Wolf, S. A. *Int. Mater. Rev.* 2016, 61, 456. doi:10.1080/09506608.2016.1204097
- [133] Bell, C.; Burnell, G.; Leung, C. W.; Tarte, E. J.; Kang, D.-J.; Blamire, M. G. *Appl. Phys. Lett.* 2004, 84, 1153. doi:10.1063/1.1646217
- [134] Baek, B.; Rippard, W. H.; Benz, S. P.; Russek, S. E.; Dresselhaus, P. D. *Nat. Commun.* 2014, 5, 3888. doi:10.1038/ncomms4888
- [135] Qader, M. A. E.; Singh, R. K.; Galvin, S. N.; Yu, L.; Rowell, J. M.; Newman, N. *Appl. Phys. Lett.* 2014, 104, 022602. doi:10.1063/1.4862195
- [136] Baek, B.; Rippard, W. H.; Pufall, M. R.; Benz, S. P.; Russek, S. E.; Rogalla, H.; Dresselhaus, P. D. *Phys. Rev. Appl.* 2015, 3, 011001. doi:10.1103/PhysRevApplied.3.011001
- [137] Ryazanov, V. V.; Bol'ginov, V. V.; Sobanin, D. S.; Vernik, I. V.; Tolpygo, S. K.; Kadin, A. M.; Mukhanov, O. A. *Phys. Procedia* 2012, 36, 35-41. doi:10.1016/j.phpro.2012.06.126
- [138] Baibich, M. N.; Broto, J. M.; Fert, A.; Nguyen Van Dau, F.; Petroff, F.; Etienne, P.; Creuzet, G.; Friederich, A.; Chazelas, J. *Phys. Rev. Lett.* 1988, 61, 2472. doi:10.1103/PhysRevLett.61.2472

- [139] Bergeret, F. S.; Volkov, A. F.; Efetov, K. B. Phys. Rev. Lett. 2001, 86, 3140. doi:10.1103/PhysRevLett.86.3140
- [140] Houzet, M.; Buzdin, A. I. Phys. Rev. B 2007, 76, 060504. doi:10.1103/PhysRevB.76.060504
- [141] Niedzielski, B. M.; Diesch, S. G.; Gingrich, E. C.; Wang, Y.; Loloee, R.; Pratt, W. P., Jr.; Birge, N. O. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2014, 24, 1800307. doi:10.1109/TASC.2014.2311442
- [142] Zdravkov, V. I.; Lenk, D.; Morari, R.; Ullrich, A.; Obermeier, G.; Müller, C.; Krug von Nidda, H.-A.; Sidorenko, A. S.; Horn, S.; Tidecks, R.; Tagirov, L. R. Appl. Phys. Lett. 2013, 103, 062604. doi:10.1063/1.4818266
- [143] Martinez, W. M.; Pratt, W. P., Jr.; Birge, N. O. Phys. Rev. Lett. 2016, 116, 077001. doi:10.1103/PhysRevLett.116.077001
- [144] Clinton, T. W.; Johnson, M. Appl. Phys. Lett. 2000, 76, 2116. doi:10.1063/1.126271
- [145] Samokhvalov, A. V. Phys. Rev. B 2009, 80, 134513. doi:10.1103/PhysRevB.80.134513
- [146] Nevirkovets, I. P.; Shafraniuk, S. E.; Chernyashevskyy, O.; Yohannes, D. T.; Mukhanov, O. A.; Ketterson, J. B. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016, 26, 1301907. doi:10.1109/TASC.2016.2624752
- [147] Nevirkovets, I. P.; Mukhanov, O. A. Possible use of a multi-terminal superconducting-ferromagnetic device as a memory cell. In Proceedings of 16th International Superconductive Electronics Conference, ISEC'2017, Sorrento, Italy, June 12-16, 2017; TU-SDM-06.
- [148] Bol'ginov, V. V.; Stolyarov, V. S.; Sobanin, D. S.; Karpovich, A. L.; Ryazanov, V. V. J. Exp. Theor. Phys. Lett. 2012, 95, 366-371. doi:10.1134/S0021364012070028
- [149] Larkin, T. I.; Bol'ginov, V. V.; Stolyarov, V. S.; Ryazanov, V. V.; Vernik, I. V.; Tolpygo, S. K.; Mukhanov, O. A. Appl. Phys. Lett. 2012, 100, 222601. doi:10.1063/1.4723576
- [150] Golovchanskiy, I. A.; Bol'ginov, V. V.; Stolyarov, V. S.; Abramov, N. N.; Ben Hamida, A.; Emelyanova, O. V.; Stolyarov, B. S.; Kupriyanov, M. Yu.; Golubov, A. A.; Ryazanov, V. V. Phys. Rev. B 2016, 94, 214514. doi:10.1103/PhysRevB.94.214514
- [151] Vernik, I. V.; Bol'ginov, V. V.; Bakurskiy, S. V.; Golubov, A. A.; Kupriyanov, M. Yu.; Mukhanov, O. A. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2013, 23, 1701208. doi:10.1109/TASC.2012.2233270
- [152] Bakurskiy, S. V.; Klenov, N. V.; Soloviev, I. I.; Bol'ginov, V. V.; Ryazanov, V. V.; Vernik, I. V.; Mukhanov, O. A.; Kupriyanov, M. Yu.; Golubov, A. A. Appl. Phys. Lett. 2013, 102, 192603. doi:10.1063/1.4805032
- [153] Bakurskiy, S. V.; Klenov, N. V.; Soloviev, I. I.; Kupriyanov, M. Yu.; Golubov, A. A. Phys. Rev. B 2013, 88, 144519. doi:10.1103/PhysRevB.88.144519
- [154] Soloviev, I. I.; Klenov, N. V.; Bakurskiy, S. V.; Bol'ginov, V. V.; Ryazanov, V. V.; Kupriyanov, M. Yu.; Golubov, A. A. Appl. Phys. Lett. 2014, 105, 242601. doi:10.1063/1.4904012
- [155] Ruppelt, N.; Sickinger, H.; Menditto, R.; Goldobin, E.; Koelle, D.; Kleiner, R.; Vavra, O.; Kohlstedt, H. Appl. Phys. Lett. 2015, 106, 022602. doi:10.1063/1.4905672
- [156] Bakurskiy, S. V.; Klenov, N. V.; Soloviev, I. I.; Kupriyanov, M. Yu.; Golubov, A. A. Appl. Phys. Lett. 2016, 108, 042602. doi:10.1063/1.4940440
- [157] Zhu, Y.; Pal, A.; Blamire, M. G.; Barber, Z. H. Nat. Mater. 2017, 16, 195-199. doi:10.1038/nmat4753
- [158] Golubov, A. A.; Kupriyanov, M. Yu. Nat. Mater. 2017, 16, 156-157. doi:10.1038/nmat4847
- [159] Chen, T.; Dumas, R. K.; Eklund, A.; Muduli, P. K.; Houshang, A.; Awad, A. A.; Dürrenfeld, P.; Malm, B. G.; Rusu, A.; Åkerman, J. Proc. IEEE 2016, 104, 1919-1945. doi:10.1109/JPROC.2016.2554518
- [160] Soloviev, I. I.; Klenov, N. V.; Bakurskiy, S. V.; Kupriyanov, M. Yu.; Golubov, A. A. J. Exp. Theor. Phys. Lett. 2015, 101, 240-246. doi:10.1134/S002136401504013X
- [161] Iovan, A.; Golod, T.; Krasnov, V. M. Phys. Rev. B 2014, 90, 134514. doi:10.1103/PhysRevB.90.134514
- [162] Golod, T.; Iovan, A.; Krasnov, V. M. Nat. Commun. 2015, 6, 8628. doi:10.1038/ncomms9628
- [163] Buzdin, A.; Koshelev, A. E. Phys. Rev. B 2003, 67, 220504. doi:10.1103/PhysRevB.67.220504
- [164] Pugach, N. G.; Goldobin, E.; Kleiner, R.; Koelle, D. Phys. Rev. B 2010, 81, 104513. doi:10.1103/PhysRevB.81.104513
- [165] Goldobin, E.; Sickinger, H.; Weides, M.; Ruppelt, N.; Kohlstedt, H.; Kleiner, R.; Koelle, D. Appl. Phys. Lett. 2013, 102, 242602. doi:10.1063/1.4811752
- [166] Bakurskiy, S. V.; Klenov, N. V.; Karminskaya, T. Yu.; Kupriyanov, M. Yu.; Golubov, A. A. Supercond. Sci. Technol. 2013, 26, 015005. doi:10.1088/0953-2048/26/1/015005
- [167] Bakurskiy, S. V.; Filippov, V. I.; Ruzhickiy, V. I.; Klenov, N. V.; Soloviev, I. I.; Kupriyanov, M. Yu.; Golubov, A. A. Phys. Rev. B 2017, 95, 094522. doi:10.1103/PhysRevB.95.094522
- [168] Lipman, A.; Mints, R. G.; Kleiner, R.; Koelle, D.; Goldobin, E. Phys. Rev. B 2014, 90, 184502. doi:10.1103/PhysRevB.90.184502
- [169] Goldobin, E.; Koelle, D.; Kleiner, R. Phys. Rev. B 2015, 91, 214511. doi:10.1103/PhysRevB.91.214511
- [170] Slonczewski, J. C. J. Magn. Magn. Mater. 2002, 247, 324-338. doi:10.1016/S0304-8853(02)00291-3
- [171] Ralph, D. C.; Stiles, M. D. J. Magn. Magn. Mater. 2008, 320, 1190. doi:10.1016/j.jmmm.2007.12.019

- [172] Chiba, T.; Bauer, G. E. W.; Takahashi, S. Appl. Phys. Lett. 2013, 102, 192412. doi:10.1063/1.4806982
- [173] Park, J.; Ralph, D. C.; Buhrman, R. A. Appl. Phys. Lett. 2013, 103, 252406. doi:10.1063/1.4851855
- [174] Ye, L.; Gopman, D. B.; Rehm, L.; Backes, D.; Wolf, G.; Ohki, T.; Kirichenko, A. F.; Vernik, I. V.; Mukhanov, O. A.; Kent, A. D. J. Appl. Phys. 2014, 115, 17C725. doi:10.1063/1.4865464
- [175] Ye, L.; Wolf, G.; Pinna, D.; Chaves-O'Flynn, G. D.; Kent, A. D. J. Appl. Phys. 2015, 117, 193902. doi:10.1063/1.4920991
- [176] Waintal, X.; Brouwer, P. W. Phys. Rev. B 2002, 65, 054407. doi:10.1103/PhysRevB.65.054407
- [177] Zhao, E.; Sauls, J. A. Phys. Rev. B 2008, 78, 174511. doi:10.1103/PhysRevB.78.174511
- [178] Tserkovnyak, Y.; Brataas, A. Phys. Rev. B 2002, 65, 094517. doi:10.1103/PhysRevB.65.094517
- [179] Maekawa, S.; Takahashi, S.; Imamura, H. J. Phys. D: Appl. Phys. 2002, 35, 2452-2456. doi:10.1088/0022-3727/35/19/321
- [180] Halterman, K.; Alidoust, M. Supercond. Sci. Technol. 2016, 29, 055007. doi:10.1088/0953-2048/29/5/055007
- [181] Ortlepp, T.; Van Duzer, T. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2014, 24, 1300307. doi:10.1109/TASC.2014.2318309
- [182] Kimel, A. V.; Kirilyuk, A.; Usachev, P. A.; Pisarev, R. V.; Balbashov, A. M.; Rasing, T. Nature 2005, 435, 655-657. doi:10.1038/nature03564
- [183] Kirilyuk, A.; Kimel, A. V.; Rasing, T. Rev. Mod. Phys. 2010, 82, 2731-2784. doi:10.1103/RevModPhys.82.2731
- [184] Klenov, N. V.; Kuznetsov, A. V.; Soloviev, I. I.; Bakurski, S. V.; Tikhonova, O. V. Beilstein J. Nanotechnol. 2015, 6, 1946-1956. doi:10.3762/bjnano.6.199
- [185] Murphy, A.; Averin, D. V.; Bezryadin, A. New J. Phys. 2017, 19, 063015. doi:10.1088/1367-2630/aa7331
- [186] Giazotto, F.; Peltonen, J. T.; Meschke, M.; Pekola, J. P. Nat. Phys. 2010, 6, 254-259. doi:10.1038/nphys1537